

В.С. КОССОВ, д-р техн. наук, ФГУП ВНИКТИ (Россия)
Ю.А. ПАНИН, ФГУП ВНИКТИ (Россия)

СНИЖЕНИЕ ФРИКЦИОННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В КРИВЫХ

Приводиться концепція комбінованої лубрикації рейок, результати теоретичних та експериментальних досліджень її ефективності.

Приводится концепция комбинированной лубрикации рельсов, результаты теоретических и экспериментальных исследований ее эффективности.

The concept of combined rail lubrication, the results of theoretical and experimental researches of its efficiency are considered.

ВНИКТИ более 10 лет занимается проблемой «колесо-рельс». За это время разработана, успешно внедрена и продолжает расширяться лубрикация рельсов по технологии ВНИКТИ.

На девяти дорогах эксплуатируются 102 рельсо-смазывателя конструкции ВНИКТИ (рис. 1), от-личительной особенностью которых от аналогов является бесконтактное нанесение смазочного покрытия на боковую грань головки рельса. Конструкция рельсосмазывателя постоянно совершенствуется. Так, например, снижено потребление воздуха на нужды поддержания смазки в рабочем состоянии в баках-смесителях рельсосмазывателя до размеров естественных утечек из пневмосистемы локомотива, устранен шум, производимый баком-смесителем. Эксплуатационная скорость поднята до 70 км/ч и введена зависимость подачи смазки от скорости движения локомотива. По официальным данным [1] благодаря применению автономных рельсосмазывателей остановлен рост подреза гребней на сети железных дорог России. Теперь акцент эффективности применения лубрикации смещается в сторону снижения энергетических затрат на тягу поездов. Перед железнодорожной наукой поставлена задача повышения экономии энергоресурсов [2]. Достижению указанной цели давно служит применяемая на сети железных дорог технология лубрикации боковой грани головки рельса. По данным [3] подобная технология позволяет за счет снижения фрикционного сопротивления в кривых снизить потребление энергоресурсов на тягу поездов до 9 %. Эффект лубрикации боковой грани головки рельса наружной нитки кривой с точки зрения экономии энергоресурсов этим и ограничивается. Технология лубрикации боковых граней головок рельсов по большому счету себя исчерпала. Поэтому це-

лям экономии энергоресурсов, которые напрямую зависят от снижения фрикционного сопротивления в кривых, на данном этапе уделяется за рубежом, а теперь и в России, особое внимание.

Замечено [4], что при смазывании только боковой грани головки рельса существует некоторое увеличение сил воздействия на путь. В США и Канаде давно обратили внимание [5] на эффект снижения бокового воздействия на путь при дополнительном смазывании поверхности катания внутреннего рельса кривой.

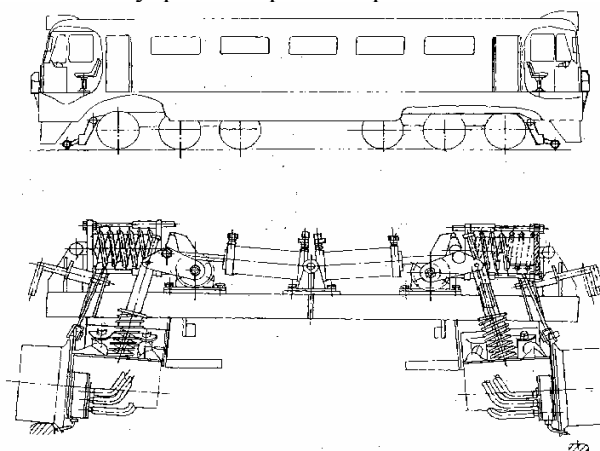


Рис. 1. Внешний вид рельсосмазывателя

С целью изучения этого эффекта ВНИКТИ провел ряд натурных экспериментов с привлечением специалистов из БГТУ. Каждый натуральный эксперимент был смоделирован на компьютере, что позволило получить предварительные теоретические данные проводимого эксперимента.

Компьютерное моделирование проводилось для трехосной тепловозной тележки при следующих вариантах трибологического состояния головок рельсов.

Вариант 1 – коэффициент трения скольжения в возможных точках контакта колесной па-

ры с рельсами (рассматривается двухточечный контакт колеса с рельсом) одинаков и равен 0,3 (исходный вариант).

Вариант 2 – коэффициент трения скольжения в контакте между гребнем левого (по ходу движения) колеса с боковой поверхностью и выкружкой наружного рельса равен 0,1 (смазывание боковой грани головки наружного рельса), в остальных точках контакта – 0,3.

Вариант 3 – коэффициент трения скольжения гребня левого колеса по боковой грани головки наружного рельса и поверхности катания правого колеса по внутреннему рельсу равен 0,1, в остальных точках контакта – 0,3.

На рис. 2, 3 приведены изменения показателей, по которым оценивалось влияние лубрикации на рамные, боковые и направляющие силы, углы набегания, факторы износа, для режимов выбега и тяги в зависимости от скорости.

На рис. 2 видно, что рамные силы во всех трех вариантах трибологического состояния практически не меняются. Это объясняется природой рамных сил, которая напрямую связана с силами инерции обрессоренных масс. Во втором варианте наблюдается незначительный их рост в пределах 5...7 %. Направляющие силы, боковые давления во втором варианте так-

же вырастают на 5 %. Однако в третьем варианте, то есть при дополнительном смазывании, еще и поверхности катания внутреннего рельса боковые давления и направляющие силы снижаются в 1,5...2 раза. Этот интересный факт можно объяснить уменьшением поперечной составляющей сил трения внутреннего колеса. Надо отметить, что угол набегания при всех трех вариантах практически одинаков и изменяется только с ростом скорости в пределах от 12,5 до $11 \cdot 10^{-3}$ рад. Во втором и третьем вариантах наблюдается резкое снижение (в 3...5 раз) факторов износа по удельной работе сил трения Φ_a и фактору износа по мощности трения Φ_c (см. рис. 3). В результате компьютерного моделирования также получены значения сил продольного и поперечного крива. В табл. 1 показано изменение их от скорости. Таблица наглядно демонстрирует, что поперечный крив ППК на колесную пару по второму варианту несколько увеличился (2...3 %), а по третьему варианту снизился даже на 30 % при скоростях движения 30...50 км/ч и на 10...13 % – при скорости 70 км/ч. Силы продольного крива на левых колесах снизились: в вариантах 2 и 3 в 1,5...1,8 раза, а на правых колесах – в 5...8 раз.

Таблица 1

Номер варианта лубрикации	Обозначение крива на колесе	Скорость, км/ч		
		30	50	70
		Поперечные силы крива первой колесной пары в режиме выбега, кН		
1	ППК11	17,5	18,7	22,8
	ППК12	31,8	28,8	21,5
	На кол. пару	49,3	47,5	44,3
2	ППК11	21,8	23,5	28,8
	ППК12	31,9	29	21,9
	На кол. пару	53,7	52,5	50,7
3	ППК11	24,5	26	30,5
	ППК12	10,9	10,0	7,7
	На кол. пару	35,4	36	38,2

На рис. 4 приводится распределение сил продольного и поперечного крива и трения в забеге по колесным парам первой тележки в режиме тяги на скорости 30 км/ч. Здесь видно, что при втором варианте в 3 раза уменьшаются продольные силы трения на гребнях набегających на этот рельс колес и одновременно возрастают продольные силы крива, так как сила тяги в основном реализуется на поверхностях катания колес, поперечные силы крива изменяются незначительно. При дополнительном смазывании поверхности катания внутреннего

рельса по третьему варианту происходит уменьшение в 2,5 раза поперечных сил крива на набегającej колесной паре, в 8 раз силы трения на гребне набегającego колеса и увеличение продольных сил крива на колесах, перемещающихся по наружному рельсу, таким образом, появляется момент, отворачивающий колесные пары от наружного рельса в кривой.

В табл. 2 приведены моменты сопротивления повороту передней тележки, создаваемые силами в контакте колес с рельсами для рассматриваемых вариантов смазывания рельсов.

Таблица 2

Номер варианта лубрикации	Момент сопротивления повороту тележки, кН/м	Угол набегания тележки, рад	Полюсное расстояние X_1 , м
1	298,51	0,0129	3,87
2	290,23	0,0132	3,96
3	68,61	0,0125	3,72

По табл. 2 видно, что лубрификация по варианту два, то есть нанесение смазочного покрытия на боковую грань головки рельса, ненамного уменьшает момент сопротивления повороту тележки. Лубрификация по третьему варианту (дополнительное смазывание поверхности катания внутреннего рельса) этот момент уменьшает в 4,3...5 раза.

Трибологическое состояние поверхностей головок рельсов оказывает существенное влияние на тяговые качества локомотивов. Многолетним опытом эксплуатации тягового подвижного состава на рельсах, подвергшихся лубрикации боковой грани в кривых участках пути доказано, что эта технология лубрикации не вызывает отрицательных последствий в реализации тяги локомотивом. При смазывании боковой грани головки наружного рельса в кривой уменьшается работа сил трения скольжения гребней набегающих колес на этом рельсе и, следовательно, уменьшается величина дополнительной составляющей сопротивления

движению локомотива в кривых. Сравнение продольных сил крипа колес, которые реализуют силу тяги в контакте, особенно при наименьшей из рассмотренных скоростей движения $V=30$ км/ч (рис. 4) (максимальная сила тяги), показывает, что существенных изменений этих сил нет, но смазывание поверхности катания приводит к снижению коэффициента трения и сцепления колес с рельсами. Возникает естественное опасение в возможной потере тяги локомотивом. Рассмотрим механизм перераспределения тяги по колесам поподробнее.

Для начала следует определить силу тяги, реализуемую каждой колесной парой и в целом локомотивом при первом и третьем вариантах лубрикации рельсов. Сила тяги каждой колесной пары определяется из суммы продольной силы крипа на каждом колесе и силы трения на гребне набегающего на рельс колеса. Результаты теоретических расчетов для скорости 30 км/ч приводятся в табл. 3.

Таблица 3

Номер варианта лубрикации	Сила тяги по осям тепловоза, кН						Сила тяги на локомотив, кН
	1	2	3	4	5	6	
1	35,4	36,2	36,1	34,5	35,0	36,4	213,5
3	35,1	35,6	38,7	35,3	35,7	36,4	216,8

Суммарная сила тяги на локомотив по третьему варианту лубрикации даже несколько выше, что можно объяснить снижением дополнительного сопротивления в кривой, на преодоление которого расходовалась часть мощности локомотива. Суммарные силы крипа по колесам, являющиеся векторными суммами двух составляющих (продольной и поперечной), определим по формуле

$$F_c = \sqrt{\text{ПРК}^2 + \text{ППК}^2}.$$

Результаты расчетов сил в контакте колес с рельсами для реализации тяги на скорости движения 30 км/ч приводятся в табл. 4.

Анализируя данные табл. 4, можно сказать, что большая часть силы тяги реализуется все же правыми колесами, то есть колесами, движущимися по внутреннему рельсу. Разница сил

крипа на левом и правом колесах существенна. На смазанных же рельсах большая часть силы тяги реализуется левыми колесами, а разница между левым и правым колесами по продольным силам крипа уже меньше. Сравнивая суммарные силы крипа и силу трения скольжения соответствующих колесных пар, можно заметить, что запас по трению, то есть разница между этими силами, при несмазанных рельсах неоспоримо больше смазанных, исключая набегающее левое колесо первой оси, сильно разгруженное в точке контакта поверхностей качения колеса и рельса. В обоих вариантах лубрикации первая колесная пара является лимитирующей по силе тяги. Правые колеса катятся по смазанной поверхности внутреннего рельса на пределе по сцеплению, но левые колеса, катящиеся по наружному рельсу, имеют некоторый запас по трению, поэтому срыва колесных

пар при боксовании не наблюдается. Нормальные нагрузки в первом варианте в точках контакта колес с рельсами меньше, чем в третьем варианте. Если просуммировать все нормальные силы варианта 1 и варианта 3, то получится соответственно $N_1=1227,6$ кН и $N_1=1300,3$ кН, то есть значительная часть вертикальной нагрузки при несмазанных рельсах передается через гребни набегающих колес из-за действия большой направляющей силы. Разница в направляющих силах левого набегающего колеса первой колесной пары для вариантов лубрикации 1 и 3 составляет 49,8 кН.

Для проведения натуральных экспериментов был сформирован состав, состоящий из секции

тепловоза 2ТЭ116, вагона-лаборатории и порожного полувагона. Состав прокатывался в кривой $R = 300$ м по одним и тем же рельсам в разные временные периоды с разным трибологическим состоянием поверхностей головок рельсов. Был выбран участок кривой длиной 100 м, оборудован тензометрическими датчиками для определения бокового воздействия на путь экспериментальным составом. Трибологическое состояние поверхностей рельсов определялось инструментально – трибометром конструкции ВНИКТИ. Было три варианта трибологического состояния поверхностей рельсов. Результаты измерений приведены в табл. 5.

Таблица 4

Вариант лубрикации 1 (не смазанные рельсы)					
№ колеса	ПРК, кН	ППК, кН	F_c , кН	Нормальная нагрузка N , кН	Сила трения, кН
11	6,6	17,5	18,7	64,5	19,35
12	15,8	26,6	30,94	104,6	31,38
21	7,0	20,5	21,66	79,6	23,88
22	21,3	27,6	34,86	123,7	37,11
31	2,1	9,6	9,82	96,4	28,92
32	34,0	5,6	34,46	127,6	38,28
41	70	20,2	21,38	72,1	21,63
42	17,4	29,5	34,25	119,3	35,79
51	6,0	22,6	23,38	88,9	26,67
52	21,1	26,8	34,11	125,4	37,62
61	6,6	-2,6	7,09	115	34,5
62	29,8	-1,0	29,80	110,5	33,15
Вариант лубрикации 3 (смазана боковая грань головки наружного рельса и поверхность катания внутреннего $f=0,1$)					
11	23,6	13,8	26,94	91,0	27,3
12	9,9	4,8	11,00	110,4	11,04
21	24,0	13,5	27,54	96,0	28,8
22	11,6	4,2	12,24	122,1	12,21
31	23,5	1,2	23,53	100,6	30,2
32	12,1	0,21	12,10	122,6	12,26
41	23,8	14,8	28,03	94,3	28,29
42	11,5	4,9	12,50	125,9	12,95
51	21,4	8,5	23,33	99,6	29,88
52	12,3	1,6	12,4	115,7	11,57
61	23,1	-23,6	33,02	123,1	36,93
62	9,1	-3,6	9,78	99,0	9,9

Таблица 5

Место измерения коэффициента трения на головке рельса	Вариант лубрикации 1	Вариант лубрикации 2	Вариант лубрикации 3
Боковая поверхность головки наружного рельса	0,3...0,35	0,08	0,08
Поверхность катания внутреннего рельса	0,14...0,27	0,14...0,27	0,08

На рис. 2 приведены значения полуразностей кромочных напряжений и боковых сил, действующих на наружный рельс от первой и четвертой осей тепловоза 2ТЭ116. Аналогич-

ные зависимости наблюдаются и при прохождении вагона-лаборатории и полувагона. Результаты приведенных натуральных испытаний, также как и результаты компьютерного моде-

лирования, подтвердили эффективность смазывания поверхности катания внутреннего рельса при одновременной лубрикации боковой грани головки наружного рельса. Так, для набегающей первой оси в диапазоне скоростей 30...70 км/ч в варианте 3 по сравнению с исходным вариантом 1 полуразность кромочных напряжений снижается на 23...61 %, боковые силы – на 28...50 %.

Второй эксперимент, проведенный во ВНИКТИ, был посвящен определению сопротивления движению подвижного состава, а именно секции тепловоза 2ТЭ116 порожнего полувагона и вагона-лаборатории при трибологическом состоянии поверхностей рельсов, показанным в табл. 5. Испытания показали, что при нанесении смазки одновременно на боковую поверхность наружного рельса и на поверхность катания внутреннего рельса для экипажей с трехосными тележками общее снижение основного и дополнительного сопротивления составляет от 22,6 % в кривой радиусом 620 м и до 34,5 % – в кривой радиусом 300 м. Для экипажей с двухосными тележками общее снижение основного и дополнительного сопротивлений в круговых кривых для груженых вагонов составляет приблизительно 7,5 %, для порожних вагонов – 5,7 %.

Таким образом, расчетами и экспериментально установлено, что целенаправленным изменениям трибологического состояния рельсов в кривых малого радиуса (коэффициент трения боковой поверхности наружного рельса составляет 0,06...0,15, поверхности катания наружного рельса – 0,25...0,35, внутреннего рельса – 0,15...0,20) можно уменьшить сопротивление движению локомотивов в 1,6...1,8 раза, боковое воздействие экипажа на путь – на 30...60 %, фактор износа по удельной работе сил трения на гребнях направляющих колес – в 4...11 раз в зависимости от скорости. Однако с точки зрения реализации силы тяги локомотивов существующая на данном этапе лубрикации практика некачественного нанесения лубрикантов на боковую грань головки наружного рельса в кривой, то есть случайные занесения смазки на поверхность катания рельса, может свести на нет все попытки внедрения комбинированной лубрикации, то есть дополнительного

смазывания поверхности катания головки внутреннего рельса. Это одна из причин, почему на железных дорогах США стала широко применяться технология со стабилизированным коэффициентом трения на поверхности катания, который достигается за счет внедрения в качестве смазочного материала так называемого модификатора трения (смазочной композиции с коэффициентом трения в пределах 0,2...0,3). Подобная технология является компромиссом между комбинированной лубрикацией с одинаковым коэффициентом трения и применением активаторов трения, повышающих коэффициент сцепления.

В 2002 году разработана конструкция рельсосмазывателя для комбинированной лубрикации на базе существующих рельсосмазывателей ВНИКТИ. Были проведены натурные эксперименты по отработке технологии нанесения модификатора трения, который представляет собой жидкую субстанцию, наносимую на рельс методом мелкодисперсного распыла. Отличительной особенностью технологии ВНИКТИ является бесконтактное нанесение на рельс как лубриканта (смазочного вещества), так и модификатора. Конструкция рельсосмазывателя для комбинированной лубрикации предусматривает навешивание оборудования на все типы локомотивов и смазывание рельсов после локомотива последней колесной пары перед колесами следом идущего вагона. Характеристики модификатора и лубриканта подобраны с расчетом прохода 200 колесных пар, то есть количества осей одного состава.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Стратегическая программа обеспечения устойчивого взаимодействия в системе «колесо–рельс». – М., 2004.
2. Богданов В.М., Захаров С.М. Современные проблемы системы «колесо–рельс» // Железные дороги мира. – 2004. – № 1. – С. 57-62.
3. Продление срока службы рельсов и колес // Железные дороги мира. – 2000. – № 9. – С. 62-65.
4. Улучшение взаимодействия подвижного состава и пути // Железные дороги мира. 2003. – № 2. – С. 48-53.
5. Энергетические испытания при смазке боковой поверхности рельса. – США: Отчет AAR, 1997.

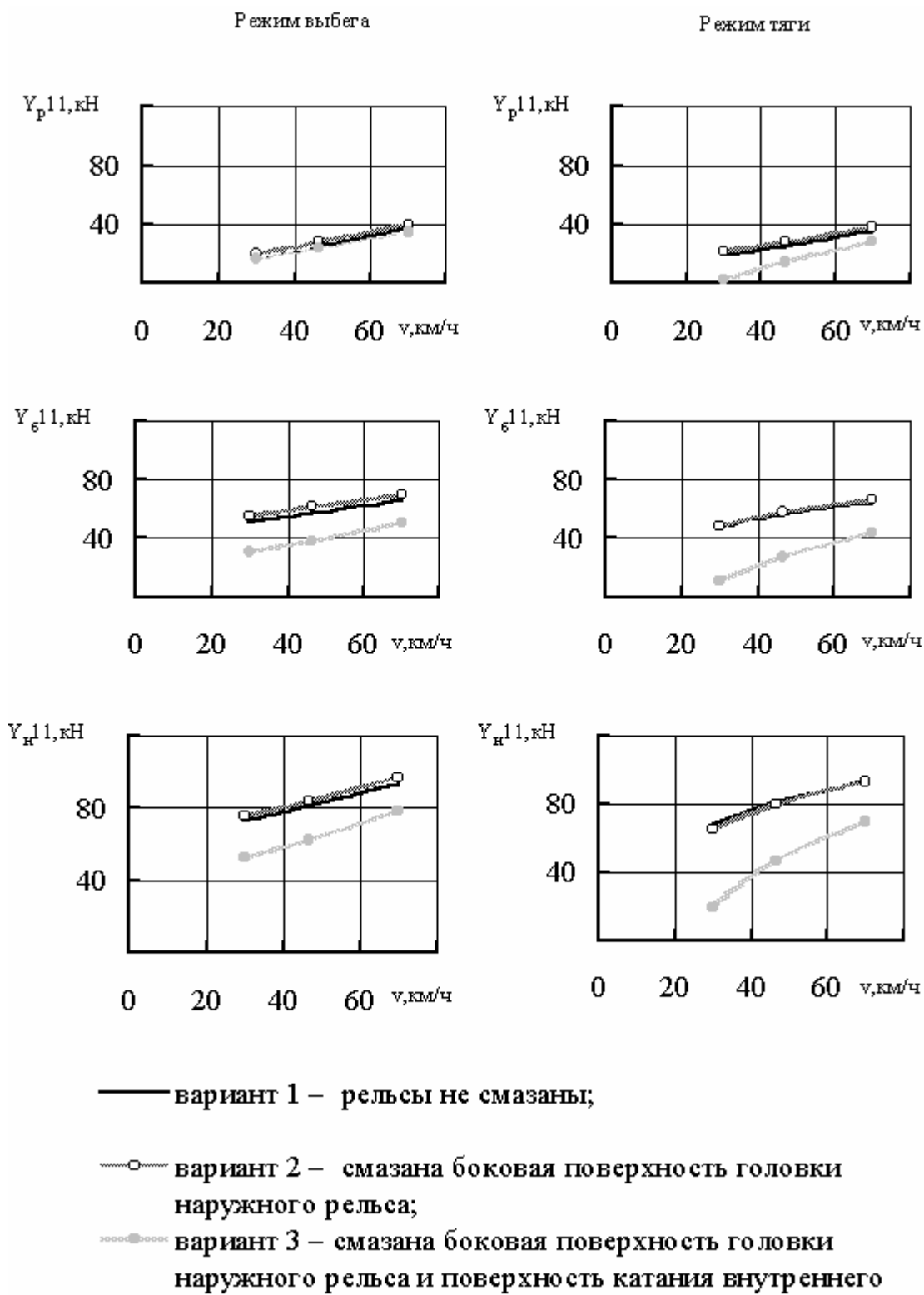


Рис. 2. Зависимость рамных, боковых и направляющих сил от трибологического состояния рельсов в кривой $R = 300$ м. Профиль конический

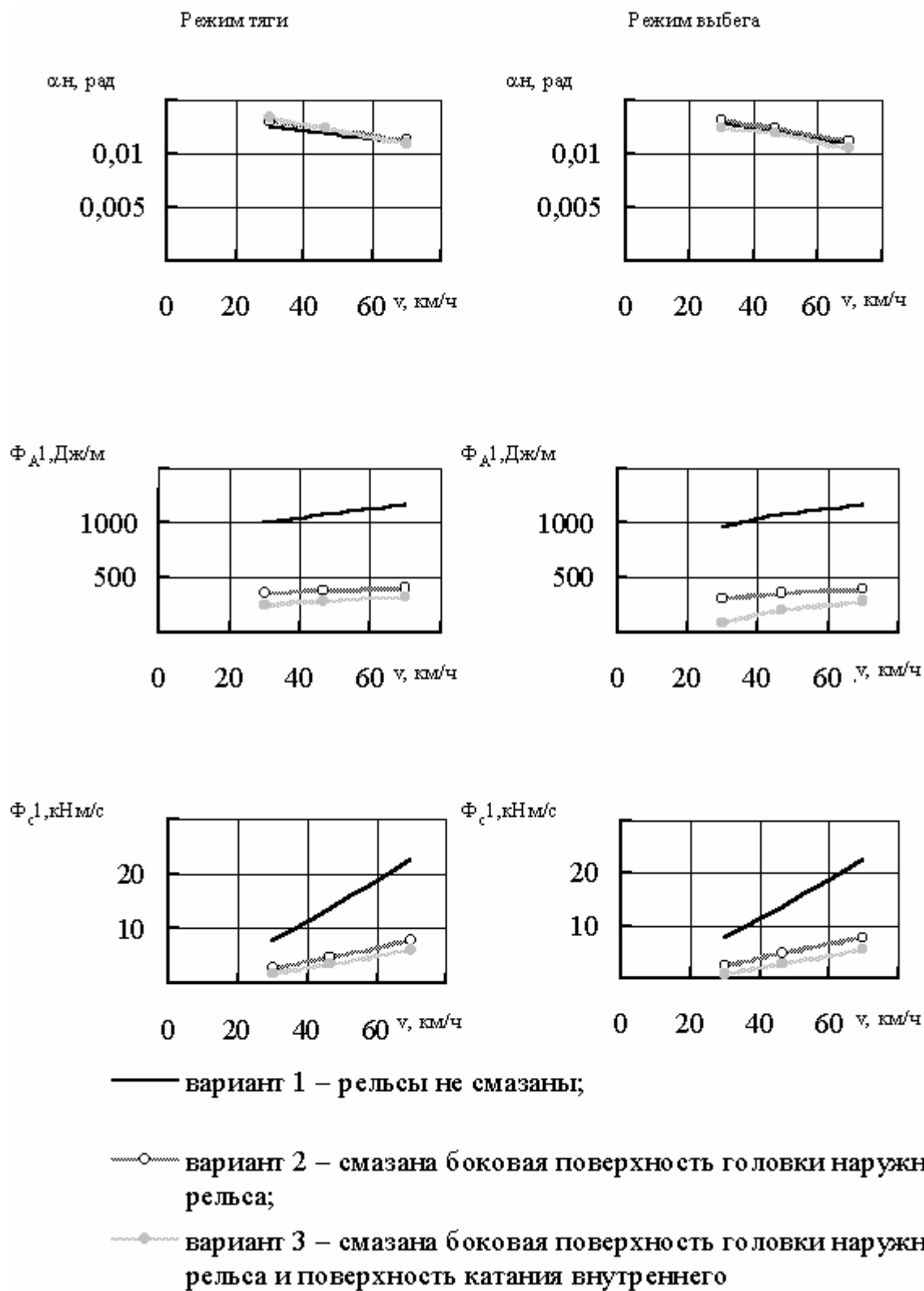


Рис. 3. Зависимость угла набегания, удельной работы и фактора износа от трибологического состояния рельсов в кривой R = 300 м

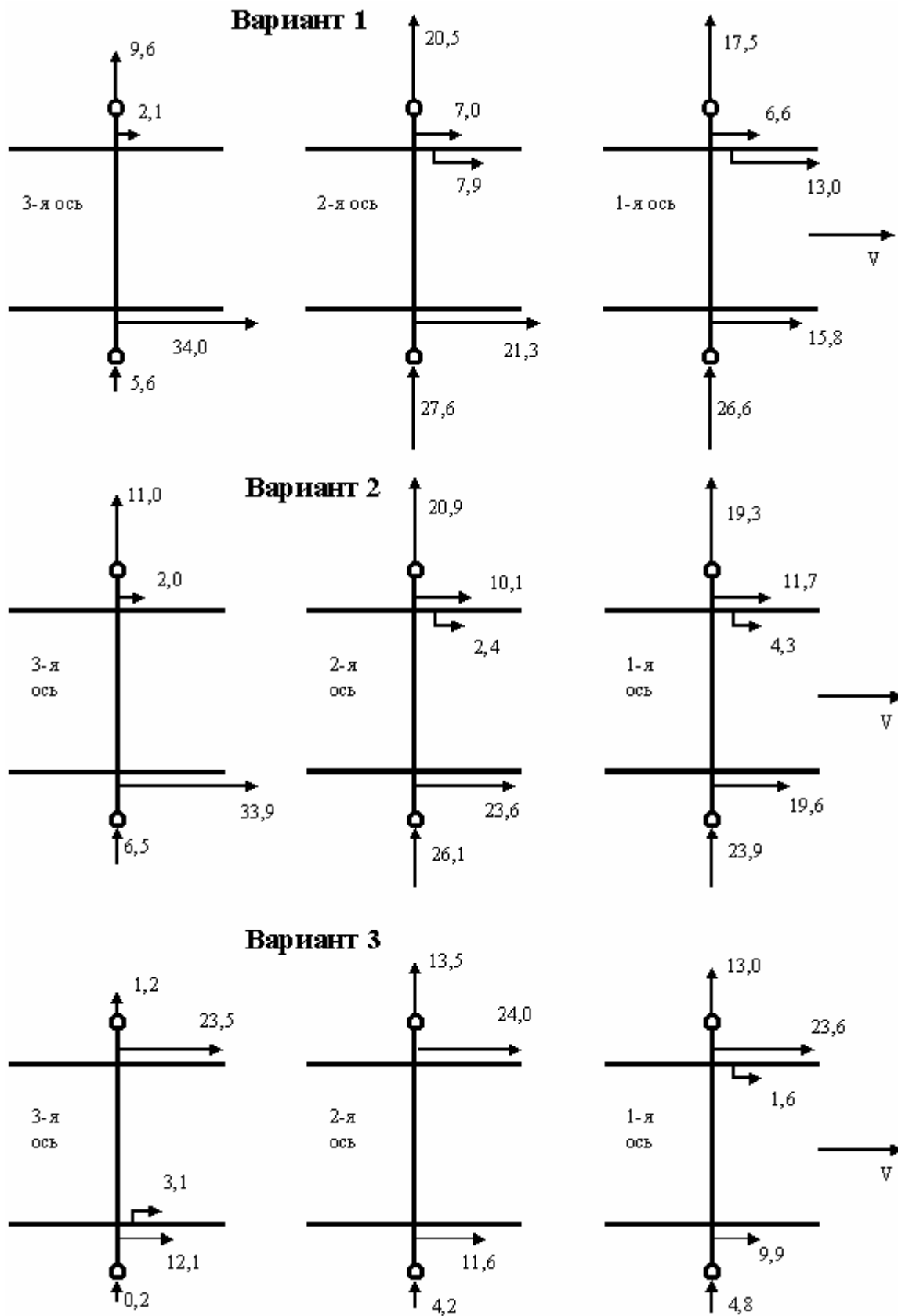
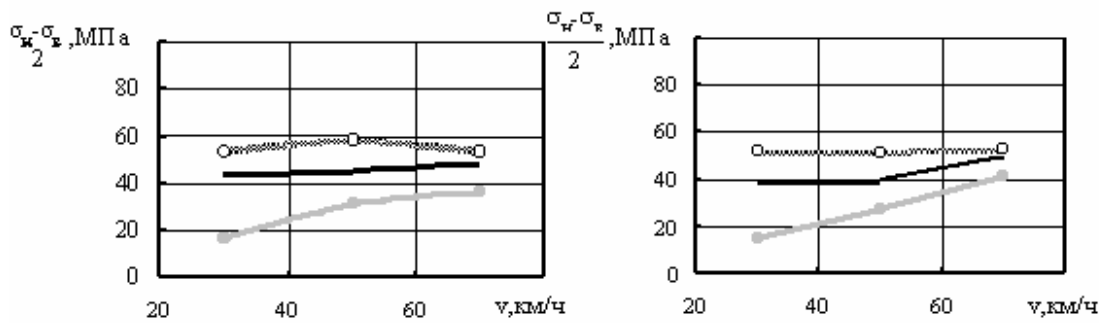


Рис. 4. Распределение сил продольного и поперечного крива и трения в забеге по колесным парам первой тележки, $v = 30$ км/ч, режим тяги

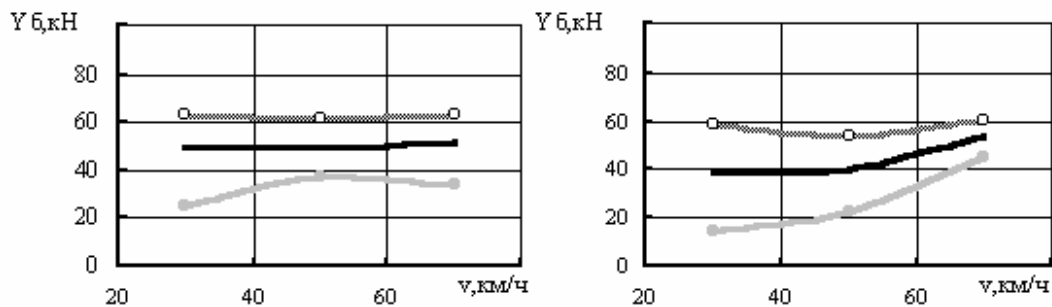
Первая ось

Четвертая ось

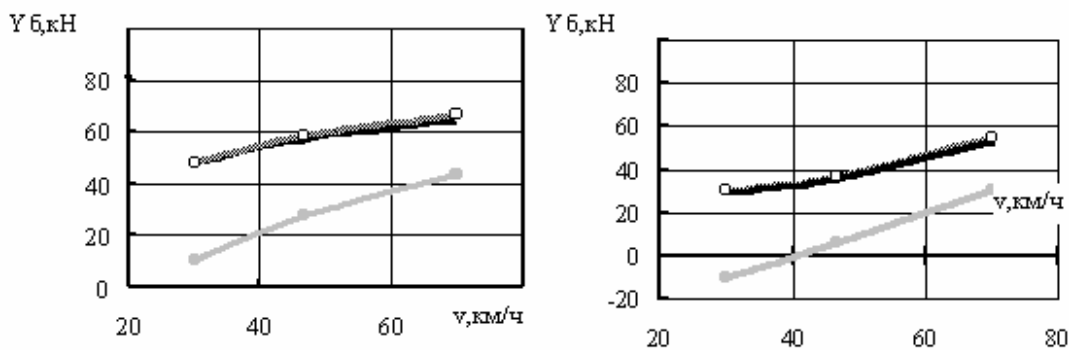
а) Полуразности краевых напряжений



б) Боковые силы (метод Шлюмпфа)



в) Боковые силы (компьютерное моделирование)



— вариант 1- рельсы несмазаны;

—○— вариант 2- смазана боковая поверхность головки наружного рельса

—●— вариант 3- смазана боковая поверхность головки наружного рельса и поверхность катания внутреннего

Рис. 5. Зависимости полуразностей краевых напряжений, боковых сил и боковых сил, полученных методом компьютерного моделирования, возникающих при воздействии на наружный рельс набегающих –осей тепловоза ТЭ116, при различном трибологическом состоянии рельсов.